



Abb.1 Fassade Allianz Arena, München

Architekt: Herzog & de Meuron / Tragwerksplanung: Sailer Stepan und Partner GmbH,
Tragwerksplanung Membran: Engineering + Design, Fertigstellung 2005

Christoph Gengnagel

Membranbau

Der Membranbau hat sich in den vergangenen Jahren von seinem Image als schwierige Bauaufgabe befreit und hin zu einer Bauweise entwickelt, die von Planern mehr und mehr gleichberechtigt zu Holz-, Stahl-, Glas- und Massivbau eingesetzt wird. Durch die Entwicklung neuer Materialien hat sich das Anwendungsspektrum dabei mittlerweile erweitert – neben großflächigen Überdachungen und mobilen Konstruktionen werden Membranen immer häufiger auch als Fassadenelement bzw. Klimahülle eingesetzt. Durch spektakuläre Neubauten wie die Allianz-Arena in München und das Eden Project in Cornwall gerät diese Entwicklung verstärkt in den Blickpunkt des Interesses.

Historische Membrankonstruktionen

Zelte

Die Verwendung dünner, weicher und flächiger Konstruktionselemente als Umhüllung gebauten Raumes ist eine der ältesten Anwendungen in der traditionellen Architektur überhaupt. Die Hirten- und Nomadenvölker in Asien und Nordafrika und die Indianerstämme Nord- und Südamerikas lebten fast ausschließlich in Zelten, die durch die Möglichkeit des schnellen Auf- und Abbaus ihrer nomadisierenden Lebensweise entsprachen. Einige dieser frühen Zeltypen finden bis in die heutige Zeit Verwendung, so z.B. der Urtyp des kegelförmigen Stangenzeltes, dessen Grundprinzip sowohl im

bekanntem Tipi (Abb.2a) der nordamerikanischen Prärieindianer als auch in den Behausungen sibirischer Jäger und Viehzüchter zu finden ist oder die tonnen- oder kuppelartig geformten Zelten der Nomaden Zentralasiens, wie z.B. Kutuk (Abb.2b) oder Jurte. Bei beiden Typen bedeckt eine weiche Hülle, bestehend z.B. aus Filzdecken, Pflanzenmatten oder Rutenbündeln, ein darunterliegendes in sich stabiles Stabwerk aus Holz. Im Gegensatz zu diesen Beispielen sind die Zeltkonstruktionen der nordafrikanischen Beduinen (Abb.2c) oder tibetischen Nomaden stark durch die Knappheit des Baustoffes Holz geprägt. Stützstangen, Abspannungen und eine textile Membran bilden hier ein Gesamtsystem, bei dem die Hülle als ein Teil des Primärtragwerks zur Gesamtstabilität beiträgt.

Segel

Die Nutzung einfacher Segel als wandelbarer Sonnenschutz hat ebenfalls eine lange Tradition. In Spanien finden die sogenannten „Toldos“ seit Jahrhunderten Anwendung, die in verwandter Form auch in Marokko, Ägypten, Syrien, der Türkei, Mittelamerika und Japan zu finden sind. Die Sonnensegel der Antike, die „Vela“, wurden über fast 600 Jahre hinweg als Sonnenschutz für Theater, Amphitheater und Stadien verwendet. Sie bestanden aus einer Stangenkonstruktion mit biegesteifen, gelenkig gelagerten Holzträgern, die über senkrecht stehenden Holzmasten abgespannt wurden. Entlang der Holzstangen konnten parallel raffbare Membranen aus textilem Material geführt werden (Abb.2d).

Schirme

Der Schirm stellt eine besondere Art des Membranbaus dar und ist wahrscheinlich die älteste Form eines wandelbaren und mobilen Daches kleiner Spannweite. Sein Konstruktionsprinzip von druckbeanspruchten Stäben, die an einem Mittelstab starr oder gelenkig befestigt eine zugbeanspruchte Membran aufspannen, blieb über die Jahrhunderte fast unverändert.

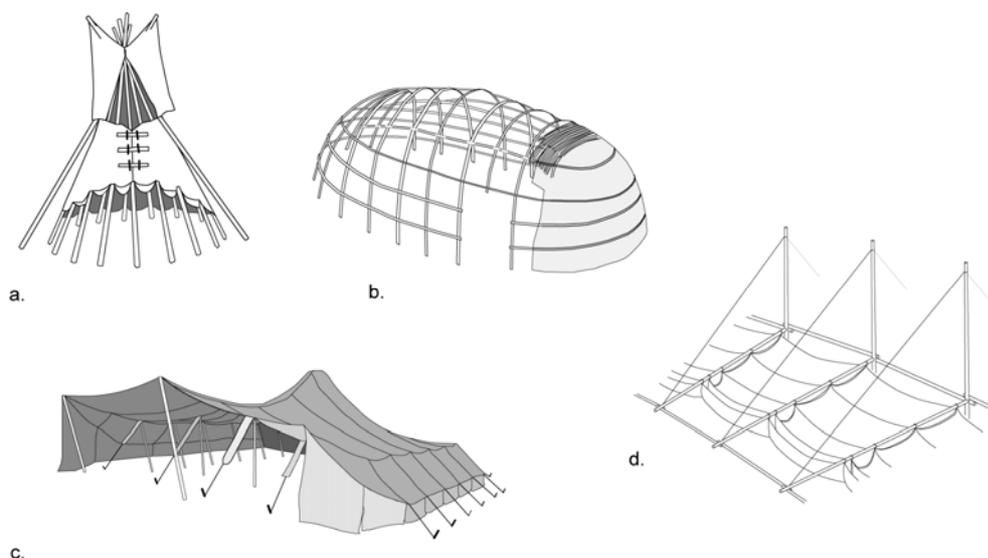


Abb.2 Traditionelle Zeltypen, Vela (Rekonstruktion nach Graefe)

Aus diesen Grundtypen der Membranbauten der Vergangenheit hat sich eine Vielzahl von neuen Konstruktionsformen und Nutzungsmöglichkeiten im modernen ingenieurmäßig konstruierten Membranbau entwickelt. Neue Möglichkeiten der Ingenieurwissenschaften des 20. Jahrhunderts, die Entwicklung neuer hochfester Membranwerkstoffe und eine langjährige Forschungsarbeit auf dem Gebiet des Membranbaus haben dabei einen großen qualitativen Wandel bewirkt, der sich vor allem in der Realisierung einer Vielzahl beeindruckender Bauten mittlerer und großer Spannweiten widerspiegelt.

Konstruktionsprinzipien

Membranen besitzen keine oder eine sehr geringe Biegesteifigkeit und eine nahezu vernachlässigbare Schubsteifigkeit. Sie sind rein zugbeanspruchte Tragelemente, die sich bei Belastungen, die nicht in

Richtung der Fläche angreifen, affin zur Beanspruchung verformen. Ebene oder einfach gekrümmte Membranflächen (Abb.3a und b) unterliegen bei Belastungen großen Verformungen und erzeugen hohe Auflagerkräfte. Durch Windlasten werden zusätzlich Schwingungen und schlagartiges Durchschlagen verursacht, was zu einer starken Geräuschbildung und dadurch zu eingeschränkten Gebrauchseigenschaften führt. Eine Stabilisierung dieser Flächen durch Vorspannung erfordert enorm große Kräfte, die das Membranmaterial und die weitere Tragkonstruktion hoch beanspruchen. Die Spannweiten solcher Membranflächen sind daher begrenzt. Ebene und einfach gekrümmte Membranflächen finden deshalb nur Anwendung bei Bauten mit einem engen Konstruktionsraster und reduzierten Anforderungen an die Gebrauchseigenschaften, wie. z.B. bei Industrie- und Festzelten. Das Potential der Membranbauweise besteht aber vor allem in der Realisierung weitgespannter Konstruktionen mit minimalem Flächengewicht und einer großen Formenvielfalt. Hierfür ist eine Stabilisierung der Flächen durch eine doppelte Krümmung in Verbindung mit einer mechanischen bzw. pneumatischen Vorspannung notwendig. Die Formen der Flächen lassen sich nicht einfach geometrisch definieren, sondern ergeben sich aus dem Gleichgewicht der Vorspannkräfte. Ihre endgültige Form im vorgespannten Zustand ist ein Resultat experimenteller oder rechnerischer Formfindungsmethoden. Antiklastisch, d.h. gegensinnig doppelt gekrümmte Flächen (Abb.3c) entstehen durch mechanisches Vorspannen, synklastisch, d.h. gleichsinnig gekrümmte Flächen (Abb.3d) durch pneumatisches Vorspannen.

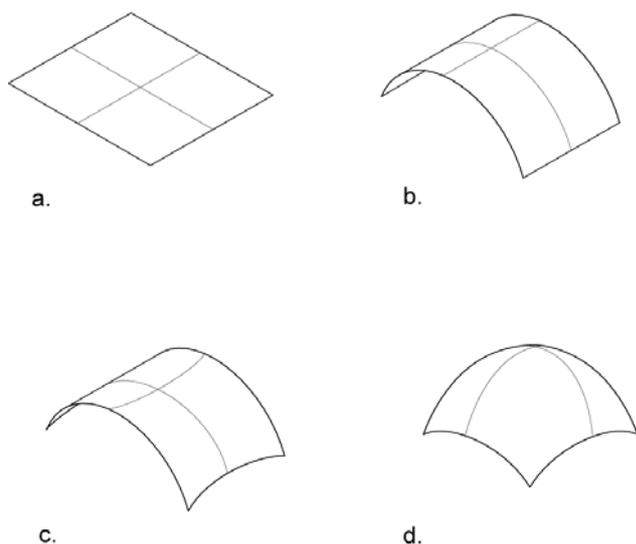


Abb.3 Formen von Membranflächen

Aus technischer Sicht sind heute Entwurf, Planung und Ausführung von Membrankonstruktionen nicht schwieriger als für andere Konstruktionen aus herkömmlichen Baustoffen wie Holz, Stahl oder Stahlbeton, sondern lediglich anders. Die Besonderheiten des Formfindungsprozesses, die der Konstruktionsweise eigenen großen Verformungen und die materialgerechte Montage müssen frühzeitig in Entwurfs-, Tragwerks- und Detailplanung berücksichtigt werden. Eine kontinuierliche Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten ist daher noch wichtiger als bei anderen Konstruktionsweisen.

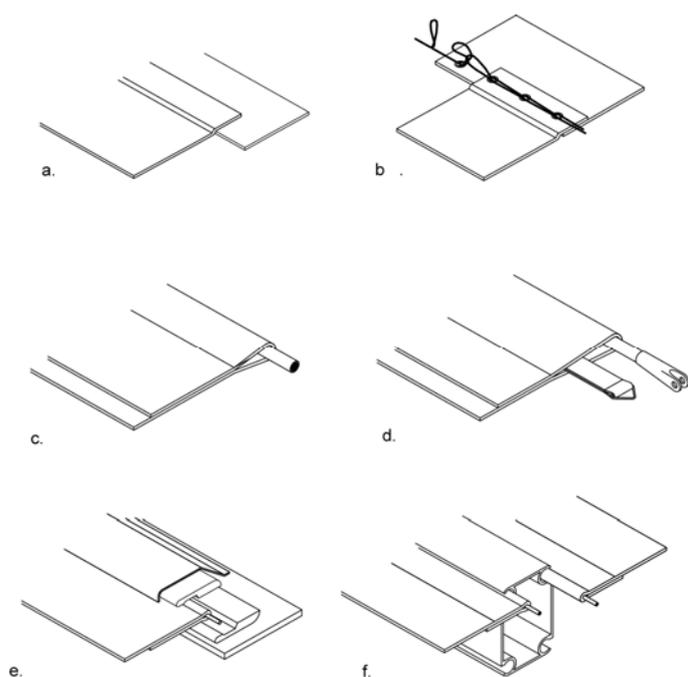


Abb.4 Prinzipielle Darstellung einiger typischer Detaillösungen:
a. HF- Schweißnaht PVC- Polyestergewebe - nichtlösbare Teilflächenverbindung
b. Kettstürstoß mit laufendem Seil- lösbare Teilflächenverbindung
c. Seil in Membrantasche - weicher Rand
d. Seil in Membrantasche und eingenähter Gurt - weicher Rand
e. Klemmplatte mit Keder ohne Perforation der Membran - steifer Rand
f. Strangpressprofil mit Kedernuten - steifer Rand

Ein grundlegendes Problem, insbesondere für den nicht mit der Bauweise vertrauten Entwerfer, ist das Fehlen spezifischer Normen für den Membranbau. Das vorhandene und zum Teil noch immer genutzte Regelwerk ist veraltet und spiegelt in keiner Weise den technologischen Fortschritt der Bauweise und den Stand der wissenschaftlichen Erkenntnisse dar. Das führt in vielen Fällen zu einer starken Abhängigkeit des Entwerfers von Genehmigungsbehörden und einem kleinen Kreis von Fachplanern und ausführenden Firmen mit entsprechenden Erfahrungen aus der Praxis. In diesem Sinne wäre es hilfreich wenn das vorhandene Wissen von Hochschulen und Forschungseinrichtungen stärker gesammelt, ergänzt und gelehrt werden würde, um den gegebenen technischen Möglichkeiten gerecht zu werden und einem breitem Feld von Anwendern zugänglich zu machen.

Auf der Materialeite wäre eine Qualitätssicherung der Materialkennwerte seitens der Hersteller durch Eigen- und Fremdüberwachung wünschenswert, die die zeitraubende Materialprüfung während des Planungsprozesses erübrigen und dem Planer frühzeitig die notwendigen materialgerechten Entscheidungsmöglichkeiten geben würde.¹

Membranmaterialien

Die Entwicklung der Kunststofftechnologie, insbesondere im Bereich der Verbundwerkstoffe, hat den modernen Membranbau seit Mitte des 20. Jahrhunderts stark beeinflusst. Mittlerweile stehen dem Planer eine ganze Vielzahl leistungsfähiger Materialien mit den unterschiedlichsten Eigenschaften zur Verfügung. Einen guten Überblick über diese Vielfalt wird in [3] und [4] vermittelt. Die im modernen

¹ Eine erste Initiative zur Schaffung eines europäischen Regelwerks ist der mit Hilfe europäischer Fördergelder zusammengestellte „Design Guide for Tensile Surface Structures“. Das Buch wurde im Rahmen eines europäischen Förderprogramms durch das Netzwerk „TensiNet“, einem europaweiten Zusammenschluss von Wissenschaftlern, Planern und ausführenden Firmen im Bereich des Membranbaus, erarbeitet und bietet dem Entwerfer Anregungen und Hilfestellungen bei der Umsetzung von Membranbauten.

Membranbau verwendeten Materialien lassen sich in die Gruppen der Gewebemembranen und der Folien unterscheiden.

Gewebemembranen

Die verschiedenen unbeschichteten und beschichteten Gewebemembranen besitzen durch die unterschiedlichen Steifigkeiten der beiden Fadenrichtungen des Gewebes ein ausgeprägtes anisotropes Materialverhalten. Die am häufigsten eingesetzten Materialien sind PVC (Polyvinylchlorid)-beschichtete Polyestergewebe und PTFE(Polytetrafluorethylen)-beschichtete Glasfasergewebe. Bei diesen Verbundwerkstoffen (Abb.5a) übernimmt das Gewebe aus hochfesten Fasern die Funktion der Lastabtragung, die Beschichtungen schützen das Gewebe vor mechanischen, chemischen und biologischen Beschädigung, gewährleisten die erforderliche Dichtigkeit gegen Feuchtigkeit und Luft und bestimmen die Transparenz des Materials.

Folien

Bei Folien müssen alle diese Funktionen durch einen einzigen Werkstoff übernommen werden (Abb.5b). Folien sind weitgehend isotrope Materialien, die im Gegensatz zu den Gewebemembranen in alle Richtungen dieselben mechanischen Eigenschaften aufweisen. Das derzeit am häufigsten eingesetzte Material, die ETFE (Ethylentetrafluorethylen)-Folie, ist ein thermoplastischer Kunststoff, der neben der hohen Transparenz, einer hohen chemischen Beständigkeit und einer für pneumatische Anwendungen ausreichenden Gasdichtigkeit den Vorteil einer nahezu vollständigen Recyclbarkeit bietet. Eine weitere Besonderheit des Materials ist die weitgehende UV-Durchlässigkeit, die in den 70er Jahren anfangs vor allem zum Einsatz bei Gewächshäusern führte. Die Tragfähigkeit der ETFE-Folie ist mit 1,50m bei mechanisch vorgespannten Konstruktionen und ca. 4-7m bei pneumatischen Anwendungen (in Abhängigkeit von der Kissenform) im Vergleich zu den üblichen Gewebemembranen wesentlich geringer.

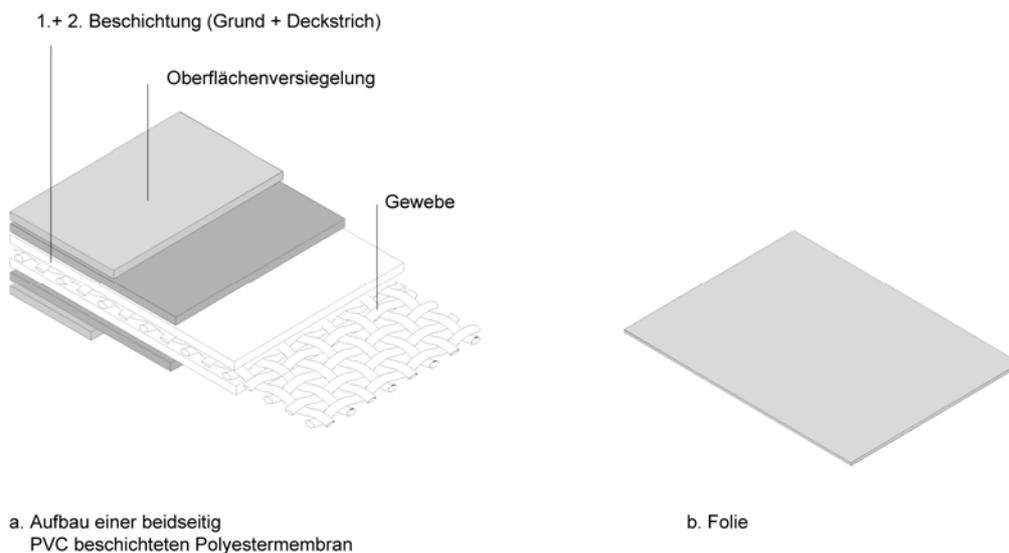


Abb.5 Aufbau einer Gewebemembran gegenüber einer Folie

Aktuelle Tendenzen

Mobile und temporäre Bauten

Membrankonstruktionen dienen heutzutage als mobile und temporäre Bauten mit unterschiedlichsten Nutzungen, Standzeiten und Aufstellorten. Die textilen Baustoffe werden dabei sowohl als einfache Hülle eines steifen Tragwerks, als auch als mechanisch bzw. pneumatisch vorgespannte Tragelemente eingesetzt. Die Vielfalt der vorhandenen Lösungen reicht von membranbedeckten einfachen Stabwerken mit Spannweiten von nur wenigen Metern bis hin zu weitgespannten Rahmen- oder Bogenhallen von über 50 m Spannweite. (Abb.6)



Abb.6 Membrangedeckte Bogenkonstruktion eines mobilen Flugzeughangars der Firma BIGTOP

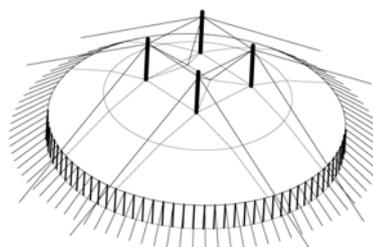


Abb.7 Schemazeichnung 4-Mast Chapiteau, Axonometrie

Vorwiegend werden sehr einfache und vielfach bewährte Konstruktionssysteme wie z.B. das traditionelle Chapiteau benutzt (Abb.7). Die seit 150 Jahren fast unveränderte Konstruktion besteht aus zwei oder mehreren Hauptmasten, die durch Seilverspannungen und Abspannungen gesichert sind und die Dachmembran stützen. Die Membranfläche ist in mehrere Bereiche mit antiklastischer Krümmung geteilt und nach außen über Sturm- und Rondellstangen abgespannt, während die Seitenwände aus ebenen bzw. einfach gekrümmten Flächen gebildet werden. Die heute zumeist verwendeten standardisierten Typen überdachen Grundflächen von 2000 und 3000m². Aufgrund ihrer hohen Knickbeständigkeit und des geringen Materialpreises werden für mobile und temporäre Bauten vorwiegend PVC-beschichtete Polyestergerewebe als Membranmaterial verwendet.

Weitgespannte Dächer – Veranstaltungsstätten, Industriebau

Für die weitgehend stützenfreie Überdachung großer Veranstaltungsbauten gehören Membranen im Zusammenspiel mit filigranen Mast-, Seil und Bogenkonstruktionen mittlerweile zu Standardlösungen, wie die Vielzahl der weltweit in den letzten Jahren realisierten Projekte zeigt. Auch in Deutschland entstanden bzw. entstehen in Vorbereitung auf die Fußballweltmeisterschaft eine ganze Reihe neuer Multifunktionsarenen mit Membrandächern, wie z.B. die Arena auf Schalke in Gelsenkirchen oder die AOL Arena in Hamburg. Bestehende Veranstaltungsstätten wurden neu konzipiert und erhalten innerhalb des Umbaus ebenfalls Teilüberdachungen aus Membranen, wie z.B. das Olympiastadion in Berlin oder das Niedersachsenstadion in Hannover.

Ein weiteres interessantes Anwendungsgebiet für weitgespannte einlagige Membrankonstruktionen sind großflächige Schutzdächer im Industriebereich. Der Carport des Amtes für Abfallwirtschaft (Abb.8) und die Überdachung des Rundmischbetts der Märker Zementwerke (Abb.9) sind eindrucksvolle Beispiele für wirtschaftliche, funktionale und elegante Industriearchitektur.

Für die Mehrzahl dieser weitgespannten Membrandächer wird PTFE-beschichtetes Glasfasergewebe aufgrund seiner Nichtbrennbarkeit, Langlebigkeit und seiner selbstreinigenden Oberfläche verwendet. Die deutlich höheren Materialkosten, die geringere Knickbeständigkeit und der daraus resultierende höhere Zeitaufwand bei Konfektion, Transport und Montage wirken sich jedoch gegenüber den PVC-beschichteten Polyestergereweben nachteilig aus.



Abb.8 Carport, Amt für Abfallwirtschaft München
Architekt: Ackermann und Partner / Tragwerksplanung:
Schlaich Bergemann und Partner, 1999



Abb.9 Überdachung Rundmischbett, Harburg, Architekt:
Ackermann und Partner / Tragwerksplanung: Fichtner +
Köppl Planung und Beratung im Bauwesen GmbH, 2000

Wandelbare Dächer

Grundsätzlich eignen sich Membranen aufgrund ihres geringen Gewichts insbesondere für wandelbare Konstruktionen, die durch eine reversible Bewegung Form und Funktion verändern können. 1997 entstand mit der Überdachung des Center Court am Rotherbaum in Hamburg das derzeit größte bewegliche textile Dach der Welt mit einer Fläche von 3000 m² (Abb.10), eine Weiterentwicklung der 1990 realisierten zentral raffbaren Überdachung der Stierkampfarena von Zaragossa. Beide Dachtragwerke nutzen als Stützkonstruktion für die Membran das Prinzip des Speichenrades, bei dem ein druckbeanspruchter Aussenring durch ein radiales System von Zugseilen gegen zwei bzw. ein Ringseil vorgespannt wird. Bei der neuen Überdachung des Waldstadions in Frankfurt am Main wird mit diesem Konstruktionsprinzip erstmals eine nahezu rechteckige Dachfläche realisiert.

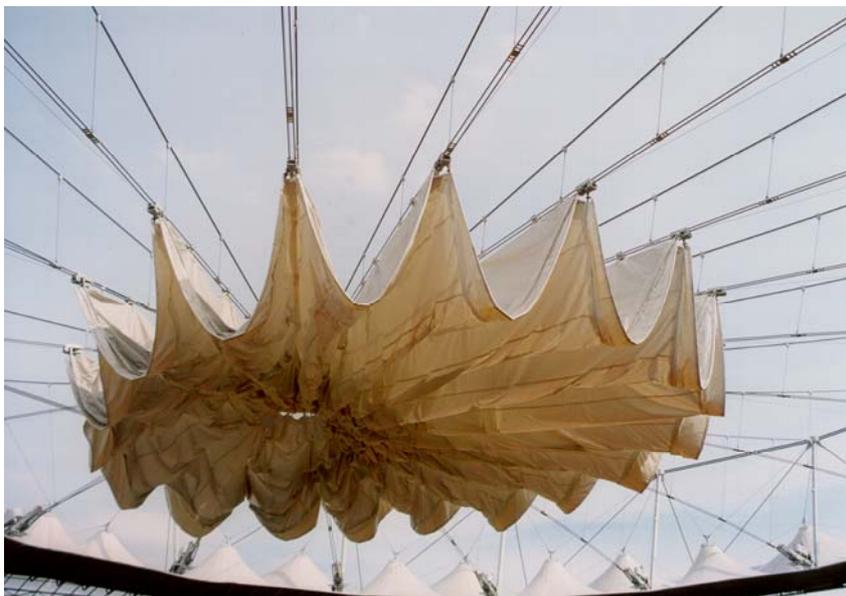


Abb. 10 Bewegliches Dach des Center Court am Rothenbaum,
Hamburg, Architektur: Schweger+Partner, Hamburg /
Tragwerksplanung: Sobek+Rieger, Stuttgart, 1997

Fassadenkonstruktionen - Klimahüllen

Ein Beispiel für den großflächigen Einsatz von Membranen in einer vertikalen Fassade eines permanenten Bauwerks ist das Hotel Burj al Arab in Dubai (Abb.11). Die doppellagige mechanisch vorgespannte Konstruktion aus PTFE-beschichtetem Glasfasergewebe spannt über eine Fassadenfläche von 7500m² und dient als Witterungs- und Sonnenschutz für das Atrium des Gebäudes.



Abb.11 Membranfassade des Hotels Burj al Arab, Dubai, Architekt:
W.S.Atkins&Partners / Tragwerksplanung: Al Haptoor Engineering, Fletcher
Construction, Murray & Roberts, 1999

ETFE-Folien bieten durch ihre hohe Transparenz neue Möglichkeiten für kleinteiligere modulare Dach und Fassadensysteme. Ein Beispiel ist die Hoffassade des 2004 realisierten Gerontecentrum in Bad Tölz (Abb.12), deren einlagige mechanisch vorgespannte Konstruktion die Erschließungszone des Gebäudes vor Witterungseinflüssen schützt und einen Zwischentemperaturbereich bildet.



Abb.12 Hoffassade des Gerontecentrum Bad Tölz,
Gesamtplanung © by D.J.Siegert Architects, 2004

Bisher wurden ETFE-Folien vor allem für Gebäudehüllen aus pneumatischen Kissen verwendet. In Großbritannien wurden zwei wegweisende Bauwerke in dieser Bauweise errichtet: die mit sechseckigen Folienkissen eingedeckten Stabwerkskuppeln des „Eden Project“ und die aus

übereinander liegenden rechteckigen Folienkissen bestehende Fassade des Raketenturms des National Space Science Centre in Leicester (Abb.13). In der Schweiz entstand in der Folge mit dem Masola-Regenwaldhaus in Zürich eine Dachkonstruktion mit langgestreckten rechteckigen Pneus von bis zu 106m Länge und 4m Breite (Abb.14). In Deutschland wird derzeit mit der Allianz Arena in München ein weiteres spektakuläres Bauwerk mit einer pneumatischen Kissenkonstruktion als Witterungsschutz errichtet. Dach und Fassade werden mit insgesamt 2784 rautenförmigen Kissen mit einer maximalen Länge von bis zu 14m verkleidet. Im Bereich der Lagerung der Kissen wurden eine Vielzahl innovativer Detaillösungen entwickelt, die für weitere Bauwerke dieser Bauart beispielgebend sind.



Abb.13 National Space Centre Centre, Leicester
Architekt: N. Grimshaw and Partners,
Tragwerksplanung: Ove Arup & Partners, 2001



Abb.14 Masola-Regenwaldhaus, Zoo Zürich, Architekten Gautschi
+Storrer, Tragwerksplanung: Minikus Witta Voss, a.b.t.
Tragwerksplanung Membran: Engineering + Design, 2003

Werden an die Membrankonstruktionen Anforderungen über den reinen Witterungsschutz hinaus gestellt, sind wesentlich komplexere mehrlagige Konstruktionen aus verschiedenen Membranmaterialien eventuell in Kombination mit flexiblen und transluzenten Dämmmaterialien erforderlich. Für die Gebäude des neuen Flughafens in Bangkok wurde zur Erfüllung der hohen Anforderungen an Transmission, Reflexion und Absorption von Licht, Wärme und Schall ein spezieller neuartiger dreilagiger Membranaufbau entwickelt, der als Innenmembran ein neu entwickeltes Low-e-beschichtetes Glasfasergewebe [4] mit stark schallabsorbierenden Eigenschaften verwendet.

Die dargestellten Beispiele zeigen eindrucksvoll die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten des modernen Membranbaus, dessen Spektrum noch keineswegs erschöpft ist. Dabei können vor allem durch eine weiterführende Forschung in bauphysikalischen Bereich neue zukunftsweisende Lösungen erwartet werden.

Referenzen

- [1] Gengnagel, C.: Wandelbare Membrandächer, in: Kunststoffe und freie Formen- Ein Werkbuch, Springer Verlag Wien 2004
- [2] Göppert, K.: Moderne Sportarenen, in: Umriss – Zeitschrift für Baukultur, Ausgabe 4/ 2002, Verlagsgruppe Wiederspahn, Wiesbaden 2002
- [3] Moritz, K.: Membranwerkstoffe im Hochbau – Gewebe und Folien, in: Transluzente Materialien, Edition Detail, Institut für Internationale Architektur- Dokumentation GmbH & Co. KG, München 2003
- [4] Pudenz, J.: Membranmaterialien, in: Bauen mit Membranen – der Innovative Werkstoff in der Architektur, Prestel Verlag, München 2004
- [5] Zettlitzer W.: Pneumatisches Bauen am Beispiel der Allianz Arena München – Details und Methodik der Planung und Fertigung, in: Kunststoffe und freie Formen- Ein Werkbuch, Springer Verlag Wien 2004

Bildnachweis:

- Abb. 1- 5,7,9 Author
- Abb. 5 BIG TOP Manufacturing, Perry, Florida
- Abb. 6 Bildarchiv ILEK, Stuttgart
- Abb. 7 Schlaich Bergermann und Partner
- Abb.10 Bernhard Kroll, Hamburg
- Abb.11 Skyspan (Europe) GmbH, Rimsting
- Abb.12 Werner Lang, München
- Abb.13 Knott, Herbie, London
- Abb.14 covertex, Obing